

Необхідно удосконалити існуючі нормативні документи шляхом введення нових науково обґрунтованих специфічних критеріїв оцінки безпеки та надійності, які дадуть змогу коректніше прогнозувати ресурс та залишковий ресурс безпечної експлуатації нафтогазопроводів у корозійно-активних середовищах.

Живучість нафтогазопроводів в корозійних середовищах досить добре піддається математичній інтерпретації і може служити важливим критерієм для оцінки експлуатаційних ризиків, залишкового ресурсу роботи елементів трубопроводу із пошкодженням та визначення черговості виконання ремонтних робіт і заходів з відновлення їх нормального функціонування.

Необхідно розробити комплексні максимально зручні та прості для розрахунків підходи оцінки живучості на всіх стадіях експлуатації.

Розроблені підходи дадуть змогу спростити прогнозування експлуатаційних ризиків та забезпечити коректну оцінку залишкового ресурсу нафтогазопроводів, які експлуатуються у складних умовах.

## **Література**

- 1 Панов Ю.Е. Тенденции развития трубопроводного транспорта и защита среды при его эксплуатации // ИНТ ВИНТИ. Сер. Трубопроводный транспорт. – 1990. – № 13. – С. 3-62.
- 2 Никитин Б.А., Вовк В.С., Гриценко А.И. Проблемы обустройства и эксплуатации морских нефтегазовых месторождений // Пром-сть России. – 2000. – № 10-11. – С. 95-97.
- 3 Крижанівський Є.І., Побережний Л.Я. Деформаційні ефекти при укладанні трубопроводу на дно моря S-методом // Нафтова і газова промисловість. – 2004. – № 2. – С. 35-39.
- 4 Крижанівський Є.І., Побережний Л.Я. Методологічні аспекти дослідження взаємозв'язку процесів деформації та руйнування трубопроводів // Нафт. і газова пром-сть. – 2002. – № 5. – С. 33-38.
- 5 Крижанівський Є.І., Побережний Л.Я. Методологія дослідження деформації та руйнування трубопроводних систем // Матеріали III міжнародної конференції „Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій”. – Львів, 2004. – С. 419-424.

УДК 622.691.4

# **МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ПРОТИТУРБУЛЕНТНИХ ПРИСАДОК НА ЕНЕРГОВИТРАТНІСТЬ ТРУБОПРОВІДНОГО ТРАНСПОРТУ НАФТИ**

*Л.Д. Пилипів, М.Д. Середюк, В.Т. Болонний*

*ІФНТУНГ, 76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42166  
e-mail: [tzng@nung.edu.ua](mailto:tzng@nung.edu.ua)*

*Путем обработки результатов промышленных экспериментов разработана методика определения коэффициента гидравлического сопротивления и энергоёмкости трубопроводного транспорта при перекачке нефти с противотурбулентной присадкой Liquid Power™ фирмы “Коноко”.*

*Method of evaluation of hydraulic resistance coefficient and power output of pipeline transport of oil with drag-reducing agent Liquid Power™ of “Conoco” corporation were developed by means of industrial experiment adaptation.*

На сьогоднішній день системою магістральних нафтопроводів України транспортується на експорт переважно російська нафта сорту Urals, яка за реологічними властивостями є ньютонівською рідиною. Для покращання транспортальних властивостей і зменшення енерговитратності перекачування нафт, що характеризуються ньютонівськими властивостями, доцільно використовувати протитурбулентні присадки. На магістральному нафтопроводі Снігурівка–Одеса з метою зменшення енерговитратності та збільшення обсягів перекачування ще з 1999 року почали застосовувати протитурбулентну присадку Liquid Power™ фірми “Коноко”. Технологічно можливим є застосування протитурбулентних присадок на будь-якому вітчизняному нафтопроводі. Технологічні розрахунки нафтопроводів при пере-

качуванні малов'язких нафт з додаванням протитурбулентних присадок мають низку особливостей і не можуть бути виконані за існуючими методиками розрахунку процесу перекачування нафт, транспортальні властивості яких не змінювали тим чи іншим способом.

Тому виникла практична необхідність розробки наукового та методологічного забезпечення реалізації спеціальної технології перекачування нафтопроводами України російської нафти сорту Urals з додаванням протитурбулентної присадки Liquid Power™. Для оцінки ефективності застосування протитурбулентної присадки на будь-якому нафтопроводі необхідно встановити взаємозв'язок між реологічними характеристиками малов'язкої нафти та енерговитратністю її трубопроводного транспорту.

Вплив кожного типу протитурбулентної присадки на кожен сорт нафти, що перекачується нафтопроводом, індивідуальний і може бути виявлений лише дослідним шляхом у лабораторних чи виробничих умовах.

Регулярному використанню енергоощадної технології перекачування російської нафти сорту Urals передували промислові випробування протитурбулентної присадки Liquid Power™ на нафтопроводі Снігурівка–Одеса. Промислові випробування проводились співробітниками Одеського районного нафтопровідного управління за присутності представників фірми "Коноко". Результати промислових експериментів із визначення впливу присадки на технологічні параметри роботи нафтопроводу Снігурівка–Одеса були передані нам для опрацювання.

Промислові експерименти виконувались за різних значень концентрації присадки та кінематичної в'язкості транспортованої нафти, що відповідають літнім, осінньо-весняним і зимовим умовам перекачування.

При проведенні промислових експериментів вимірювались фактична витрата нафти у нафтопроводі, тиск нафти на виході нафтоперекачувальної станції (НПС) Снігурівка, тиск нафти у кінці трубопроводу, кінематична в'язкість нафти та її густина. Слід зазначити, що нафтопровід Снігурівка–Одеса, як основна транзитна артерія України, оснащений сучасними засобами вимірювання тиску, температури, витрати нафти, а також фізичних властивостей нафти.

Результати промислових випробувань довели високу ефективність протитурбулентної присадки Liquid Power™ фірми "Коноко" щодо зменшення енерговитратності перекачування російської нафти сорту Urals. Ці результати стали базою для розробки нами математичних моделей з метою прогнозування гідравлічного опору і втрат енергії в нафтопроводі при перекачуванні нафти з конкретною вихідною в'язкістю при заданій витраті і відомій концентрації протитурбулентної присадки.

Перекачування нафт середньої і малої в'язкості відбувається зазвичай у зоні гідравлічно гладких труб турбулентного режиму. Як зазначалось вище, введення протитурбулентної присадки у потік рідини зменшує турбулентні пульсації і тим самим зменшує гідравлічний опір і втрати тиску у нафтопроводі. Зменшення інтенсивності турбулентних пульсацій безпосередньо впливає на характер розподілу швидкостей по перерізу турбулентного потоку, що, в свою чергу, викликає зміну коефіцієнта гідравлічного опору нафтопроводу.

При традиційній технології перекачування нафти нафтопроводом (без застосування протитурбулентної присадки) у зоні гідравлічно гладких труб турбулентного режиму коефіцієнт гідравлічного опору може бути визначений за узагальненою формулою Лейбензона

$$\lambda = \frac{A}{Re^m}, \quad (1)$$

де:  $A, m$  – коефіцієнти моделі, значення яких залежать від режиму руху нафти;

$Re$  – число Рейнольдса в нафтопроводі.

При числах Рейнольдса у нафтопроводі, менших за 70000, відповідно до формули Блазіуса маємо:  $A = 0,3164$  і  $m = 0,25$ .

Як зазначено у ряді робіт [1-3], введення протитурбулентної присадки у потік транспортованої нафти призводить до зсуву режиму її руху у бік зменшення ступеня турбулентності і збільшення товщини ламінарного прошарку. При цьому зміна профілю швидкостей у перерізі потоку і відповідна зміна режиму руху рідини в трубопроводі більш суттєво впливає на значення коефіцієнта  $m$ , ніж на значення коефіцієнта  $A$  в узагальненій моделі (1).

Тому, відповідно до теоретичних основ турбулентності з врахуванням критеріїв гідродинамічного моделювання потоку реальної рідини, пропонуємо таку математичну модель для визначення коефіцієнта гідравлічного опору нафтопроводу при перекачуванні нафти з додаванням протитурбулентної присадки:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25+K(C,v) \cdot C}}, \quad (2)$$

де:  $Re$  – число Рейнольдса в нафтопроводі, обчислене за кінематичною в'язкістю нафти з урахуванням впливу протитурбулентної присадки;

$K(C,v)$  – коригувальний коефіцієнт режиму руху, функція концентрації протитурбулентної присадки і кінематичної в'язкості нафти;

$C$  – концентрація протитурбулентної присадки в транспортованій нафтопроводом нафті.

Використовуючи дані промислових експериментів, виконуємо математичну їх обробку за допомогою комп'ютерних технологій. У результаті одержуємо графічні залежності коригувального коефіцієнта режиму руху  $K$  у формулі (2) залежно від концентрації протитурбулентної присадки і в'язкості нафти (рисунок 1).

Аналіз графіків, зображених на рисунку 1, дав змогу зробити висновок, що за фіксованої кінематичної в'язкості нафти залежність коригувального коефіцієнта режиму руху від концентрації присадки адекватно може бути описана таким логарифмічним виразом:

$$K = -A(v) \ln C - B(v), \quad (3)$$

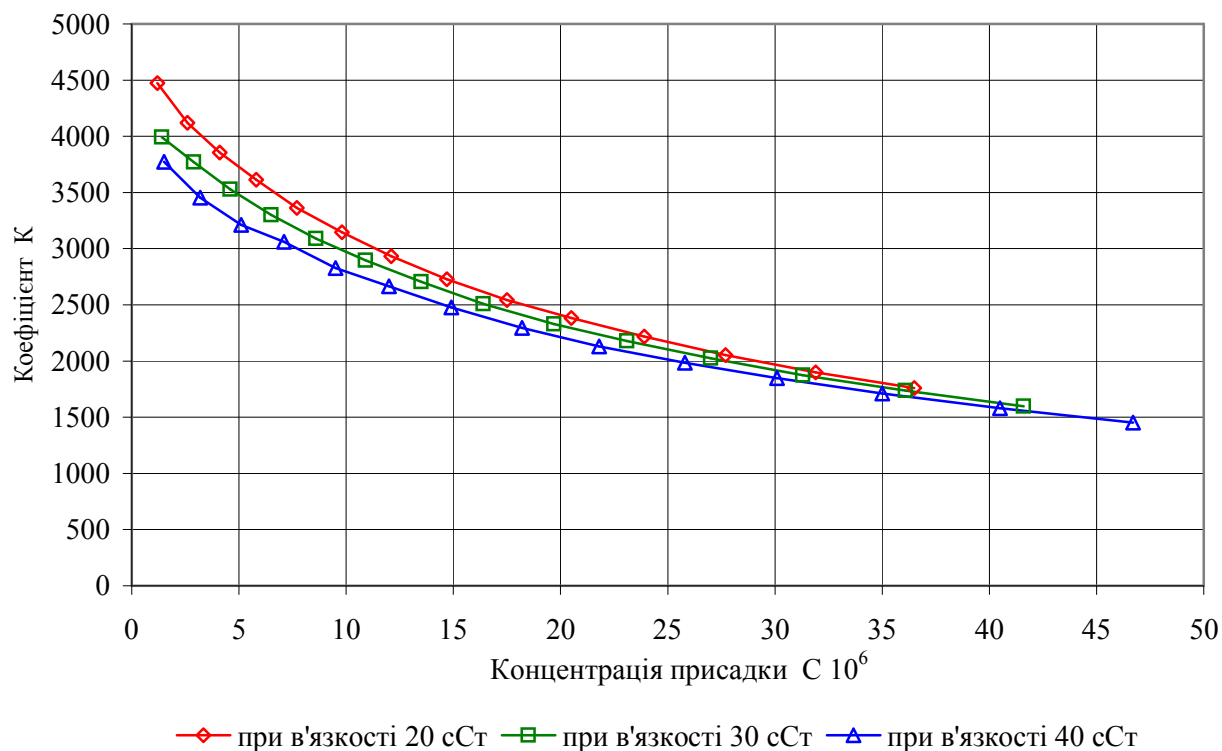
де  $A(v), B(v)$  – коефіцієнти математичної моделі, функція кінематичної в'язкості нафти.

Шляхом обробки даних промислових експериментів нами одержані такі формули для визначення значень коефіцієнтів моделі  $A$  і  $B$  залежно від величини кінематичної в'язкості нафти  $\nu$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ):

$$A = -190,28 \ln \nu - 1221, \quad (4)$$

$$B = -1723,8 \ln \nu - 12008. \quad (5)$$

Результати досліджень засвідчили, що максимальне відхилення результатів розрахунків за формулами (2)-(5) від даних промислових експериментів не перевищує 3%.



**Рисунок 1 — Залежність коригувального коефіцієнта в математичній моделі коефіцієнта гідравлічного опору від концентрації протитурбулентної присадки і в'язкості нафти**

Для перевірки адекватності одержаних моделей нами виконана математична обробка результатів штатних перекачувань російської нафти сорту Urals з додаванням протитурбулентної присадки нафтопроводом Снігурівка–Одеса. Так, наприклад, згідно з диспетчерськими даними при витраті нафти у нафтопроводі  $Q=1512$  м<sup>3</sup>/год, кінематичній в'язкості  $\nu=22,9 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, концентрації присадки  $C=6,94 \cdot 10^{-6}$  фактичне значення коефіцієнта гідравлічного опору становило  $\lambda_{\phi}=0,01781$ . Застосовуючи формули (2)–(5), визначаємо розрахункове значення коефіцієнта гідравлічного опору нафтопроводу. У результаті одержуємо  $\lambda_p=0,01856$ . Відносна різниця фактичного і розрахункового значення коефіцієнта гідравлічного опору нафтопроводу становить 4%.

Обробка статистичних даних режимних параметрів роботи нафтопроводу Снігурівка–Одеса при застосуванні протитурбулентних присадок для покращання реологічних властивостей нафти сорту Urals засвідчила, що максимальне відхилення значень коефіцієнта гідравлічного опору, розрахованих за формулами (2)–(5), від фактичних їх величин не перевищує  $\pm 10\%$ . Це свідчить про можливість практичного застосування запропонованих математичних моделей для прогнозування режимних та енергетичних параметрів роботи діючих нафтопроводів.

Якщо знехтувати безпосереднім впливом кінематичної в'язкості нафти на коефіцієнт режиму руху і обмежитись урахуванням більш

впливового чинника – концентрації протитурбулентної присадки на зменшення енерговитратності перекачування, то можна запропонувати більш просту математичну модель для коефіцієнта гідравлічного опору нафтопроводу при застосуванні протитурбулентних присадок

$$\lambda_n = \frac{I}{[A_1(1 - \lg Re)]^2 + B_1 \cdot C}, \quad (6)$$

де  $A_1, B_1$  – коефіцієнти математичної моделі, які залежать від сорту нафти і типу присадки і можуть бути визначені експериментальним шляхом.

Шляхом обробки статистичної інформації з режимних параметрів роботи нафтопроводу Снігурівка–Одеса одержана така спрощена формула для обчислення коефіцієнта гідравлічного опору при використанні протитурбулентної присадки (для діапазону зміни кінематичної в'язкості нафти від  $20 \cdot 10^{-6}$  до  $30 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с):

$$\lambda_{np} = \frac{I}{[1,85(1 - \lg Re)]^2 + 1,5 \cdot 10^6 \cdot C}. \quad (7)$$

Як показали наші розрахунки, дана залежність з максимальною похибкою  $\pm 12\%$  описує фактичні дані залежності коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса і концентрації протитурбулентної присадки.

Запропоновані нами математичні моделі для коефіцієнта гідравлічного опору нафтопроводу при застосуванні протитурбулентних присадок дали змогу розробити методику оцінювання ефективності заходів покращання реоло-

гічних властивостей малов'язких нафт з точки зору зменшення енерговитратності їх перекачування нафтопроводом.

Нехай нафтопроводом перекачується нафта з певними фізичними властивостями і витратою  $Q$ . Необхідно визначити, на скільки зменшаться втрати енергії при перекачуванні нафтопроводом заданої кількості нафти з поліпшеними реологічними властивостями за рахунок застосування протитурбулентних присадок. Концентрація присадки в транспортованій нафті становить  $C$ .

Обчислюємо коефіцієнт гідравлічного опору в нафтопроводі при перекачуванні вихідної нафти  $\lambda_1$  за формулою Блазіуса.

Застосовуючи формули (4)-(5), визначаємо коефіцієнти математичної моделі  $A$  і  $B$  при перекачуванні нафти з поліпшеними реологічними властивостями. За формулою (3) знаходимо значення коригувального коефіцієнта режиму руху рідини при заданій концентрації присадки  $C$  і кінематичній в'язкості нафти  $\nu$ . За формулою (2) знаходимо коефіцієнт гідравлічного опору при перекачуванні нафти з додаванням присадки  $\lambda_2$ .

Визначаємо втрати тиску при перекачуванні вихідної нафти та нафти з поліпшеними реологічними властивостями.

Уводимо коефіцієнт відносного зменшення втрат тиску (енергії) при перекачуванні малов'язкої нафти з поліпшеними реологічними властивостями у такому вигляді:

$$\delta_p = \frac{\Delta P_2 - \Delta P_1}{\Delta P_1} 100\%. \quad (8)$$

Із врахуванням рівняння Дарсі-Вейсбаха формула (8) набуває вигляду

$$\delta_p = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1} 100\%. \quad (9)$$

Якщо знехтувати зміною кінематичної в'язкості нафти при додаванні протитурбулентної присадки, то після математичних перетворень формула (9) для коефіцієнта відносного зменшення втрат тиску (енергії) при перекачуванні малов'язкої нафти з поліпшеними реологічними властивостями набуває вигляду

$$\delta_p = (Re^{-K \cdot C} - 1) \cdot 100. \quad (10)$$

Величина коефіцієнта  $\delta_p$  характеризує ефективність заходів щодо зменшення енерговитратності трубопровідного транспорту малов'язких нафт, що характеризуються ньютонівськими властивостями.

Для прикладу визначимо зменшення втрат тиску при перекачуванні російської нафти сорту Urals з додаванням протитурбулентної присадки Liquid Power<sup>TM</sup> фірми "Коноко" нафтопроводом Снігурівка-Одеса. Витрата нафти в нафтопроводі  $Q = 1900 \text{ м}^3/\text{год} = 0,528 \text{ м}^3/\text{год}$ . Концентрація протитурбулентної присадки  $C = 10 \cdot 10^{-6}$ . Кінематична в'язкість нафти  $\nu = 25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Внутрішній діаметр нафтопроводу  $D = 0,704 \text{ м}$ .

Визначаємо число Рейнольдса у нафтопроводі

$$Re = \frac{4 \cdot 0,528}{\pi \cdot 0,704 \cdot 25 \cdot 10^{-6}} = 38197.$$

За формулами (4) і (5) обчислюємо значення коефіцієнтів математичної моделі  $A$  і  $B$

$$A = -190,28 \ln 25 \cdot 10^{-6} - 1221 = 795,3;$$

$$B = -1723,8 \ln 25 \cdot 10^{-6} - 12008 = 6258.$$

За формулою (3) знаходимо значення коригувального коефіцієнта режиму руху нафти

$$K = -795,3 \ln 10 \cdot 10^{-6} - 6258 = 2898.$$

За формулою (10) визначаємо коефіцієнт зменшення енерговитратності трубопровідного транспорту нафти при застосуванні протитурбулентної присадки

$$\delta_p = \left( 38197^{-2898 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} - 1 \right) \cdot 100 = -26,3\%.$$

Таким чином, розрахунки показали, що при концентрації протитурбулентної присадки  $C = 10 \cdot 10^{-6}$  можна для даного режиму роботи нафтопроводу Снігурівка-Одеса на 26% зменшити втрати енергії на перекачування нафти сорту Urals.

Запропоновані методика і програмне забезпечення дають змогу з необхідною для практичних розрахунків точністю прогнозувати режимні та енергетичні параметри роботи нафтопроводу при перекачуванні нафти сорту Urals з протитурбулентними присадками.

### Література

- 1 Середюк М.Д., Якимів Й.В., Лісафін В.П. Трубопровідний транспорт нафти і нафтопродуктів. – Кременчук, 2001. – 517 с.
- 2 Пилипів Л.Д. Математичне моделювання коефіцієнта гідравлічного опору нафтопроводу при використанні протитурбулентних присадок // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. – № 1(16). – С. 90-95.
- 3 Пилипів Л.Д. Дослідження впливу протитурбулентних присадок на реологічні властивості нафти і пропускну здатність магістрального нафтопроводу // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2006. – № 3(20). – С. 50-54.